

氏名	やぎ まさはる 八木 政治
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	博甲第695号
学位授与の日付	平成26年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	工芸科学研究科 設計工学専攻
学位論文題目	Studies on Development of Controllers and State Estimation Filters for Teleoperation Systems with Communication Networks (ネットワークを介する遠隔制御システムのためのコントローラと状態推定フィルタの開発に関する研究)
審査委員	(主査)教授 曾根 彰 教授 黒江康明 教授 村田 滋 准教授 澤田祐一

論文内容の要旨

本論文では、ネットワークを介する遠隔制御システムのためのコントローラと状態推定フィルタの開発に関して議論する。本論文は、ネットワークを介する柔軟マスタスレーブアームを用いたバイラテラル制御システムに関する問題とランダムな遅延時間の影響を受ける線形確率システムの状態推定に関する問題の2部構成として記述する。

まず始めに、ネットワークを介する柔軟マスタスレーブアームを用いたバイラテラル制御システムの問題について考える。本研究で扱うバイラテラル制御システムは、1リンクの剛体マスタアームと並行構造を持つ1リンクの柔軟スレーブアームによって構成される。柔軟スレーブアームは線形モデルの場合と非線形モデルの場合の2種類について議論する。また、柔軟スレーブアームはサーボモータによって駆動される。提案するバイラテラル制御システムを厳密に考えるためには、柔軟スレーブアームとサーボモータをひとつのシステムとして取り扱わなければならない。したがって、サーボモータの数学モデルの導出が必要となる。サーボモータはPDコントローラとDCモータによって構成されていることが分かっているため、サーボモータが発生するトルクを参照入力と出力を用いて記述することが出来る。このトルクが柔軟スレーブアームの制御トルクとなるため、これを用いることによって柔軟スレーブアームとサーボモータをひとつのシステムとして取り扱うことが可能となる。

更に、マスタアームとスレーブアームは遅延時間が生じるネットワークによって結合されている。本研究では、発生する遅延時間として、一定の遅延時間、時変の遅延時間、ランダムな遅延時間を考える。これらの遅延時間によって、マスタアームとスレーブアームの間を通信する参照入力などの信号は時間軸に沿って平行移動するか乱されることになる。これらの遅延時間が発生するネットワークを介するバイラテラル制御システムに対して、マスタアームとスレーブアームのコントローラを導出するために、提案するバイラテラル制御システムの総エネルギーに基づくリヤプノフ関数の候補を考える。このリヤプノフ関数の候補を時間によって微分することで、マスタアームに対して反トルクを生成するPDコントローラとスレーブアームに対して制御トルクを

生成する PDS コントローラが導出される。提案するバイラテラル制御システムの安定性はリヤブノフの安定定理によって証明され、その結果、各コントローラのゲインに対する条件が導出される。また、システムの受動性についても消散不等式を満足することから証明される。

そして、提案するバイラテラル制御システムの性能を数値シミュレーションと実機実験によって実証する。実機実験においては、遅延時間をパソコンによって仮想的に実現している。

次に、ランダムな遅延時間の影響を受ける観測データによって構成される線形確率システムの状態推定問題について議論する。本研究では、ランダムな遅延時間を 2 種類のモデルで記述する。1 つ目は、平均の遅延時間と乱雑さの和としてモデル化するものである。この場合、乱雑さとしてホワイトガウシアンノイズを用いるため、ランダムな遅延時間の分布は正規分布となる。もうひとつは確率的ロジスティック方程式としてモデル化するものである。こちらの場合、確率的ロジスティック方程式の解はある条件の下でガンマ分布を持つ。実際のネットワークに発生するランダムな遅延時間は対数正規分布となることが知られているが、方程式の解が対数正規分布を持ち且つランダムな遅延時間として十分であるというものが存在しない。そのため本研究では、基礎的な研究として平均の遅延時間とホワイトガウシアンノイズの和によってモデル化したランダムな遅延時間の場合を検証し、その発展として対数正規分布に比較的近い分布を持つ確率的ロジスティック方程式によってモデル化したランダムな遅延時間を取り扱うこととする。観測されるデータがランダムな遅延時間の影響を受けるため、観測システムの中にランダムな遅延時間が含まれることになる。

そこで本論文では、ランダムな遅延時間を陽に扱うことを目的として観測システムに対してテイラー展開を施す。これにより、乗算ノイズと呼ばれる状態量依存のノイズを観測ノイズとする双線形な観測システムが導かれる。それぞれのランダムな遅延時間のモデルにおいて、双線形な観測システムを持つ線形確率システムに対して状態推定フィルタを設計し、提案する状態推定フィルタの性能を数値シミュレーションによって評価する。

論文審査の結果の要旨

本学位申請論文では、主として次の 2 つが論じられた。(1)遅延時間が生じるネットワークを介したバイラテラル制御システムの構築、(2)ランダムな遅延時間の影響を受けるネットワークシステムのための状態推定フィルタの設計である。(1)について、本研究においてはスレーブアームに柔軟アームを採用しており、またネットワークは「一定の遅延時間」、「時変の遅延時間」が生じるとした。このような特徴を持つネットワークを介したバイラテラル制御システムに対して、安定性の観点からコントローラを設計し、その性能をシミュレーションと実機実験によって検証し、提案するバイラテラル制御が安定に動作し、またスレーブアームはマスターアームに追従していることを確かめた。(2)について、本研究におけるランダムな遅延時間のモデルとして、「平均の遅延時間と白色雑音の和」と「確率的ロジスティック方程式」を用いて、各々のモデルに対して「カルマンフィルタ」と「拡張カルマンフィルタ」を設計した。フィルタを設計する際に乗算ノイズが現れることから状態推定にはリッカチの微分方程式が必要になることを突き止め、シミュレーションによって設計したフィルタがランダムな遅延時間の影響を低減するのに有効であることを実証した。本申請者が明らかにした研究成果が、今後のネットワークを介する遠隔制御システムの開発に十分に寄与できると評価した。

以上, (1),(2)の内容には十分な新規性と工学的有用性を含んでいると認められる. なお, 学位論文の基礎となった学術論文は下記の 5 件 (査読中を含む) であり, そのいずれも申請者が筆頭著者である.

- [1] 八木政治, 林明慶, 澤田祐一, 木村浩, “遅延時間を伴う柔軟マスタースレーブアームのバイラテラル制御”, 計測自動制御学会論文集, Vol.49, No.2, pp.265-274, 2013 (掲載済)
- [2] **M. Yagi** and Y. Sawada, “Bilateral Control of Flexible Master-Slave Arms Using High-gearred Servomotor with Time-Varying Delay”, *Proc. of SICE Annual Conference 2013*, pp.180-187, 2013 (査読付き国際会議)
- [3] **M. Yagi**, M. Asano and Y. Sawada, “Bilateral Control of Nonlinear Flexible Master-Slave Arms Using High-Gearred Servomotor with Time-Varying Delay”, *Proc. of Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics*, pp.522-529, 2013 (査読付き国際会議)
- [4] **M. Yagi**, A. Hayashi and Y. Sawada, “BILATERAL CONTROL SYSTEM USING NONLINEAR FLEXIBLE SLAVE ARM WITH NETWORK DELAY”, *Int. J. of Innovative Computing, Information and Control*, Vol.10, No.2, pp.505-520, 2014 (掲載済)
- [5] **M. Yagi**, A. Hayashi, M. Asano and Y. Sawada, “Bilateral Control of Master-Slave Arms with High-gearred Servomotor-actuated Flexible Slave Arm with Time-Varying Delay”, *SICE J. of Control, Measurement, and System Integration* (査読中)